

## 원적외선 온열이 인체 자율신경기능에 미치는 영향에 관한 연구

박찬욱, 장윤호, 민세동, 강세구, 이충근, 이명호

연세대학교 공과대학 전기전자공학과  
(2004년 7월 10일 접수, 2004년 12월 21일 채택)

### A Study on Human Autonomic Nervous System Activities by Far-Infrared Ray Hyperthermia

Chan-Ouk Park, Yun-Ho Jang, Se-Dong Min, Se-Gu Kang, Chung-Keun Lee, Myoung-ho Lee

Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University  
(Received July 10, 2004. Accepted December 21, 2004)

**요약** : 본 논문에서는 원적외선 온열효과가 자율 신경계에 미치는 영향을 심박변동(HRV)을 이용하여 평가 하였다. 측정된 심박변동신호를 FFT 의한 전력스펙트럼을 구함으로써 자율 신경계의 반응 특성을 고찰하고 Poincaré plot 분석 방법을 이용하여 결과를 비교 분석하였다. 실험을 통해 심박변동 신호분석해보면 원적외선 온열에 노출되기 전에 비해 노출된 후에 매우 복잡한 모습을 관찰 할 수 있었는데 이것은 자율신경계가 관여하는 심혈관계 제어 메커니즘이 원적외선 온열에 노출되기 전보다 노출된 후에 더욱 복잡함을 반영하는 것으로 분석된다.

**Abstract** : This paper describes autonomic nervous system activities caused by hyperthermia of far-infrared ray on human body. Designed protocol and analysis algorithm were evaluated by experiments on 20 subjects to analyze the characteristic of heart rate variability(HRV) signals which could be analyzed by FFT power spectrum and time-frequency analysis. Using Poincaré' plot analysis, *LF* and *HF* were compared with *SD1* and *SD2*. During the experiment, subject was exposed to hyperthermic effects of far-infrared radiation. We could confirm that far-infrared ray, which was known to improve the blood circulation, stress state and enhancing thermal effect into human body, had an effect on human nervous system. As the hyperthermic temperature of far-infrared ray increased, the activity of cardiovascular system to sustain the homeostasis was observed by means of investigating the increase of the sympathetic activity.

**Key words** : Far-Infrared Ray(FIR), Hyperthermia, Autonomic Nervous System(ANS), Electrocardiogram(ECG), Heart Rate Variability(HRV), Poincaré' plot analysis

## 서 론

사람이 안정을 취하고 있는 상태일 지라도 심장의 박동과 박동간의 간격(R-R interval)은 일정하지 않고 조금씩 변화하는 것을 관찰 할 수 있는 데, 이러한 변화는 건강한 사람에게서 더욱 뚜렷이 관찰 할 수 있다[1]. 이러한 박동간의 미세한 변화는 인체의 조절기능을 반영하는 것으로 조절 능력이 뛰어난 사람은 심박동이 체내의 혈압, 체온, 혈중 산소 농도 등에 민감하게 반응하여 빠른 시간내에 생리적인 균형(physiological balance)을 이룰 수 있다.

심박(또는 R-R간격)은 외적환경에 대해 체내의 항상성(homeostasis)을 유지하기 위해 끊임없이 변동하며, 이와 같은 변동을 정량화한 것을 심박변동(Heart Rate Variability :

HRV)이라 한다. 최근, 심박변동을 이용하여 비관혈적으로 자율신경의 활동을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 신뢰성과 재현성이 뛰어나다는 사실이 밝혀지면서 활발한 연구가 진행 중에 있다.

이러한 HRV를 이용한 자율신경계 기능을 분석하는 방법에는 주파수영역에서의 전력 스펙트럼해석과 시간 영역에서의 통계적인 해석이 있다. 일반적으로, 심박변동의 전력 스펙트럼 상에는 세 가지 주요한 주기성분이 존재한다. 첫째는 0.2 Hz에서 0.4 Hz사이에 존재하는 호흡활동과 관련이 있는 고주파성분(이하 HF 성분), 둘째로는 혈압조절 메커니즘의 활동을 반영하는 'Mayer 파'라고 알려진 0.1 Hz부근의 저주파성분(이하 LF 성분)이며, 셋째로 체온 조절과 밀접한 관련이 있는 초저주파성분(이하 VLF 성분)이다. 이러한 주기성분은 체내/외적인 환경변화에 따라 변동하며, 이와 같은 변동은 심혈관계의 조절에 있어서 중요한 역할을 수행하는 자율신경계의 활동을 반영한다[2]~[5].

본 논문에서는 그 추정 방식을 FFT를 이용한 주파수 분석 방법을 사용하였다. 그러나 전력 스펙트럼을 추정한 결

본 논문은 2003년도 서울지방중소기업청 산학연 공동기술개발 컨소시엄 (Joint Technology Development Consortium among Industry, Academy and Research Institute)의 지원에 의해 수행(2004-06) 되었음

통신저자 : 이명호, 서울 서대문구 신촌동 134 연세대 전기전자공학부  
Tel. 02-2123-4946, Fax. 02-312-2770

E-mail. mhlee@yonsei.ac.kr

과인 FFT는 알고리즘을 이용하여 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만, 높은 주파수 해상도를 얻기 위해서는 장시간의 데이터를 필요로 하며, 제한된 길이의 데이터의 경우 주파수 해상도와 추정 스펙트럼의 질을 떨어뜨리게 된다. 따라서 본 실험에서는 충분한 실험시간을 통하여, 해상도의 질을 떨어뜨리지 않도록 하였다. 한편, 이러한 과정으로 얻어지는 LF, HF, LF/HF 비를 각 피검자의 자율신경계의 변화를 평가하기 위한 지표로 삼았다.

제안된 방법의 임상적인 검증을 위하여 원적외선 온열효과 실험을 수행하였다. 온도를 44 °C, 65 °C로 달리하여 전력스펙트럼을 구하였으며, Poincaré plot 방법[12]과 비교 분석하여 자율신경계 활동 특성을 평가하고자 한다.

## HRV 신호 처리

심박변동신호(HRV)를 유도하기 위해서는 먼저 A/D 변환된 심전도 신호로부터 R파를 검출하여 심박동열(cardiac event series)을 구성하여야 한다. 본 연구에서 R파는 위상학적 맵핑을 이용한 수정된 공간속도(spacial velocity) 알고리즘[6]을 사용하여 검출하였다. 검출된 R-R간격에서 부정맥이나 R파 검출오류를 제거한 후, 4 Hz로 재샘플링하여 등간격의 심박변동신호를 유도하였다. 이렇게 얻어진 HRV신호를 1024개의 샘플로 구성된 연속적인 레코드로 분할한 후, 각 레코드에 대해 전력스펙트럼을 추정한다. 최종적으로 추정된 전력스펙트럼으로부터 자율신경계의 활동을 반영하는 지표를 계산한다. 일반적으로 심박변동신호에 대하여 세 가지 주기 성분이 정의된다[7][8]. 첫째는 0.2 Hz에서 0.4 Hz사이의 호흡 활동과 관련이 있는 고주파 성분(이하 HF 성분), 둘째로는 혈압조절 메커니즘과 관련이 있으며, 'Mayer wave'라고 알려진 0.1 Hz를 중심으로 하는 저주파 성분(이하 LF 성분)이며, 셋째로 체온조절, 혈관운동, 다양한 심폐 메커니즘과 관련이 있을 것으로 생각되는 0.04 Hz 근방의 초저주파 성분(이하 VLF 성분)이다[5]. 일반적으로 LF 성분은 혈압조절을 담당하고 있는 압수용체반사(baroreflex)와 관련이 있으며, 주로 교감신경의 활동도를 나타내는 반면, HF 성분은 호흡과 관련이 있으며 부교감신경중에서 특히 미주신경의 활동도를 반영하는 지표로 알려져 있다. Malliani 등은 약물실험을 통하여 부교감신경을 차단하였을 때, LF 성분과 HF 성분이 동시에 감소하지만 남아 있는 성분의 대부분이 LF성분임을 근거로 LF 성분이 교감신경의 지표이고 균형비의 중요성을 강조하였다[9]. 따라서 심박변동에 영향을 미치는 교감신경계와 부교감신경계의 활동 지표로서 LF 성분과 HF 성분의 상대적 전력을 사용하는 것이 바람직하다. 또한 DC 성분 및 VLF 성분은 주기가 매우 긴 초저주파 성분이므로 본 연구에서 사용한 레코드 길이로는 분석이 불분명하며, 생리학 적 메커니즘 역시 명확하지 않기 때문에 본 연구에서 제거하였다. 일반적으로 식 (1)과 같이 각 전력 성분을 전체 전

력  $P_{Total}$  에서 VLF 성분  $P_{VLF}$  을 뺀 나머지 값으로 나누어 정규화 한다.

$$NP(f) = \frac{P(f)}{P_{Total} - P_{VLF}} \quad (1)$$

$$LF_N = \int_{0.5}^{1.5} NP(f) df \quad (2)$$

$$HF_N = \int_{2.0}^{3.0} NP(f) df \quad (3)$$

식 (1)에 의하여 정규화된 전력을 가지고 정규화된 LF 성분(이하  $LF_N$  성분)과 정규화된 HF 성분(이하  $HF_N$  성분)을 식 (2)(3)과 같이 계산할 수 있다.

## 실험 방법

### 1. 원적외선 온열 자극기

카본사 선상발열체를 이용한 온열전위 조합 자극기(Medikhan)는 피검자의 사용 편의성 등을 고려하여 매트 형식을 택하였고, 그 구성은 그림 1(a)과 같이 매트(mat)부와 조절장치(control unit)로 나누어진다.

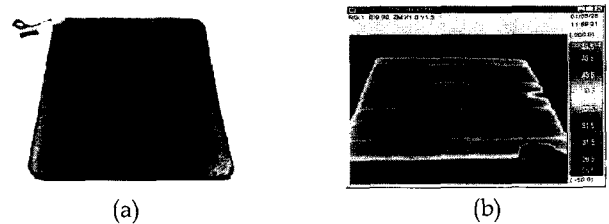


그림 1. (a) 카본사 선상발열체를 이용한 원적외선 온열 자극기 (b) 적외선 열화상

Fig. 1. (a) Hyperthermic mat effects of FIR by use of carbon pyrexia (b) infrared thermograph

### 2. 피실험자의 선정

본 실험의 피검자는 40~60대의 성인 중, 성별과 과거 및 현재의 병력(病歷) 등은 고려하지 않고 20명을 선정하였다. 선정된 피검자는 실험에 미치는 영향을 고려하여 전 날 충분한 수면을 권장하였고, 음주, 흡연 및 카페인 섭취 등을 제한하였다. 또한 실험은 인체의 생리적 리듬이 가장 안정되는 기상 후 오전 10~11시경에 시작하였다. 피검자의 연령 및 성별분포를 살펴보면 그림 2와 같다.

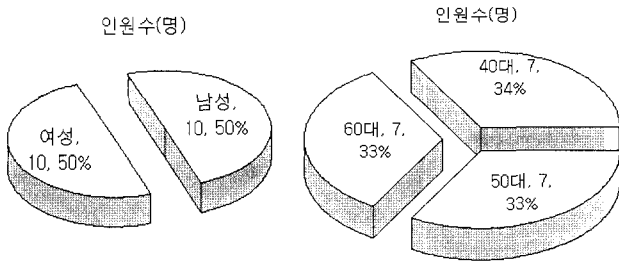


그림 2. 피검자의 분포 (평균연령 53.6±8.24 세)  
Fig. 2. Distribution of subjects (Avg. 53.6±8.24 세)

3. 실험 방법

(1) 생체신호의 측정방법

원적외선 온열효과가 인체의 자율 신경계에 미치는 효과를 고찰하기 위해, 우선 피검자를 원적외선 온열장치가 설치되어 있지 않은 일반침대에서 5분간 휴식을 취하게 하여 생리적 리듬을 안정시킨 후, 그림 3과 같이 44 °C와 65 °C로 각각 45분씩 연속적으로 온열효과를 주며 250Hz 샘플링된 ECG신호를 측정하였다.

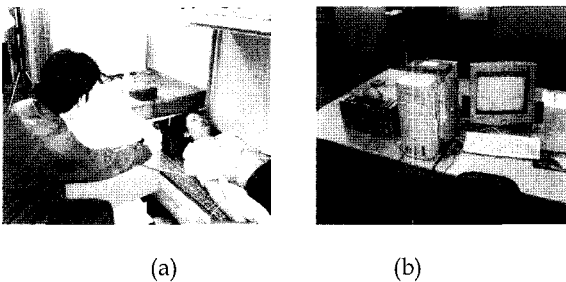


그림 3. (a)온열전위 조합자극기에 의한 생체신호 측정 (b) BIOPAC (MP150)  
Fig. 3. (a)Measurement of bio-signal by hyperthermic effects of FIR (b) BIOPAC (MP150)

결과 및 고찰

그림 4의 (a)와 같이, 원적외선 온열 자극기 사용전의 R-R 간격은 복잡도가 현저히 감소하여 전형적인 질병이나 스트레스 상태를 나타낸 반면, 그림 4의 (b)와 같이 15분 사용후에는 HRV의 변이도가 크고 복잡하게 나타나 건강한 사람의 안정된 상태[10][11]를 나타내었다.

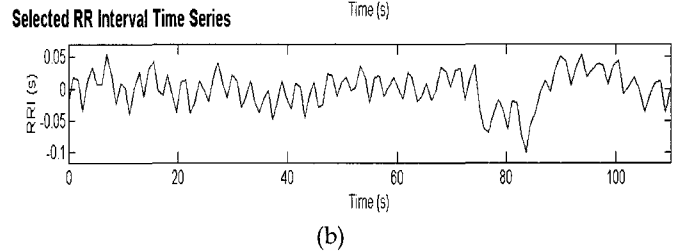
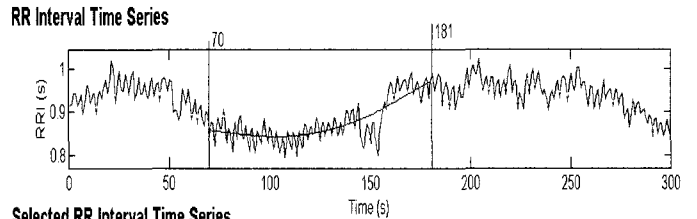
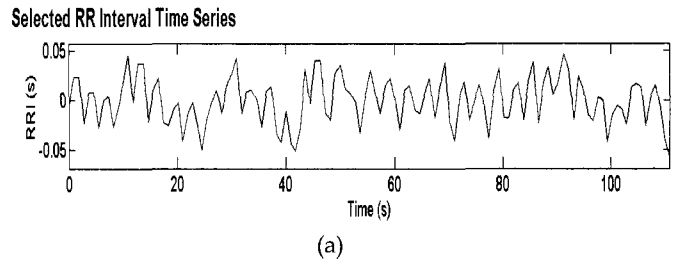
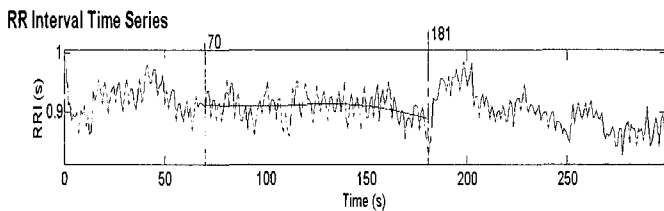
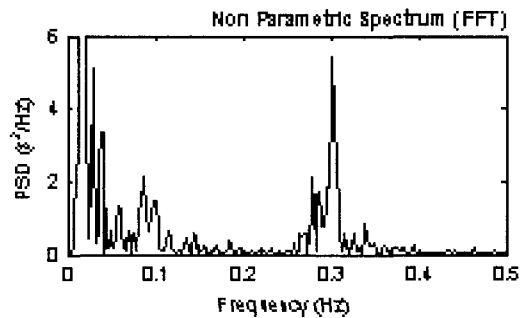


그림 4. (a)원적외선 온열 자극기 사용전의 HRV의 R-R Interval (b) 원적외선 온열 자극기 15분 사용후의 HRV의 R-R Interval  
Fig. 4. (a) HRV's R-R interval before hyperthermic effects of FIR (b) HRV's R-R interval after 15 minutes hyperthermic effects of FIR

이것은 자율신경계가 관여하는 심혈관계 제어 메커니즘이 원적외선 온열 자극기 사용 전보다 사용 후에 더욱 복잡함을 암시한다고 할 수 있다. 그리고 변화하는 내적, 외적 환경에 대하여 체내 항상성 유지를 위하여 적극적으로 반응함을 나타낸다.

기본적으로 원적외선 온열에 노출 되면, 심장의 박동을 촉진하는 교감신경의 작용이 점차 줄어들게 되고, 반대로 심장 박동을 억제하는 부교감신경의 작용이 커지게 된다. 이는 시간영역에서 실험 대상별 평균 심박동수의 변화추이를 살펴보면 쉽게 확인할 수 있다.

이렇게 얻어진 등간격의 HRV신호를 이용하여 단계별 HRV신호에 대한 FFT를 이용하여 전력스펙트럼을 5분 단위로 계산하였다. 시간에 따라 그 결과를 그림 5으로 나타내었다.



(a) 실험 5분전

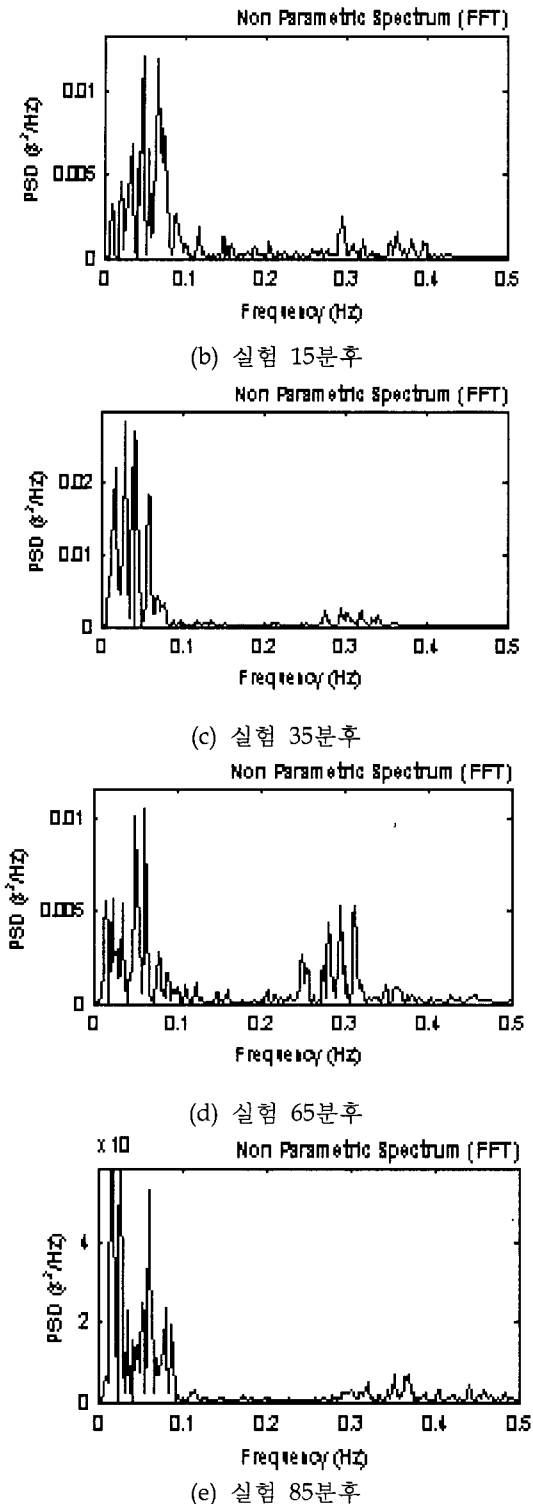
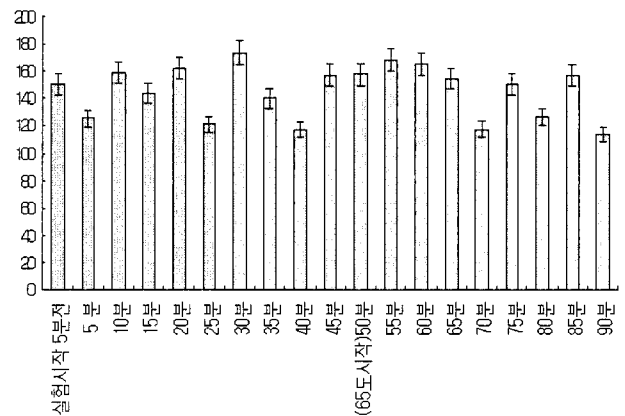


그림 5. FFT 전력 스펙트럼 밀도  
Fig. 5. FFT power spectrum density

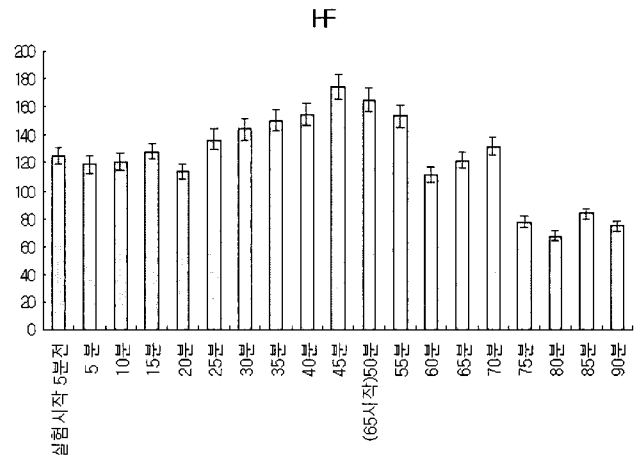
그림 5의 전력 스펙트럼을 보면, 3개의 주된 피크성분이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 원적외선 온열에 노출됨에 따라 변화하는 자율신경계의 활동을 반영하고 있다. 실험이 진행됨에 따라 실험 65분 전후로 0.1 Hz의 LF성분의 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있고 0.25 Hz의 HF성분이 감소하다가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 부교감신경의 활동이 우세하다가 감소하고 교감신경은 감소하다가 우세해지는 인체의 항상성을 유지시키려 하는 자율신경계의 길항 작용이 일어나고 있다는 것을 의미한다.

그림 6은 실험 대상자들의 LF와 HF의 변화 추이를 나타낸 것이다. 이를 통하여 원적외선 온열의 노출에 따른 LF 및 HF의 증감을 확인 할 수 있으나, 자율신경계 중에서 각 시간별로 교감신경 혹은 부교감신경계 중에서 어느 신경계가 더 항진되어 중요한 역할을 하는지는 LF/HF 비로써 더욱 확실하게 알 수 있다. 대상에 따른 LF/HF 비를 그림 6의 (c)에 나타나있다. 원적외선에 노출 되지 않은 5분과 처음 원적외선에 노출된 5분을 비교하면 LF/HF 비가 확연히 감소하는 것을 알 수 있다. 처음 44 °C의 온도에서는 45분간 LF/HF가 전체적으로 감소하다가 65 °C로 온도를 증가 시키고 10분이 지난 뒤 LF/HF 비가 증가하는 것을 알 수 있다.

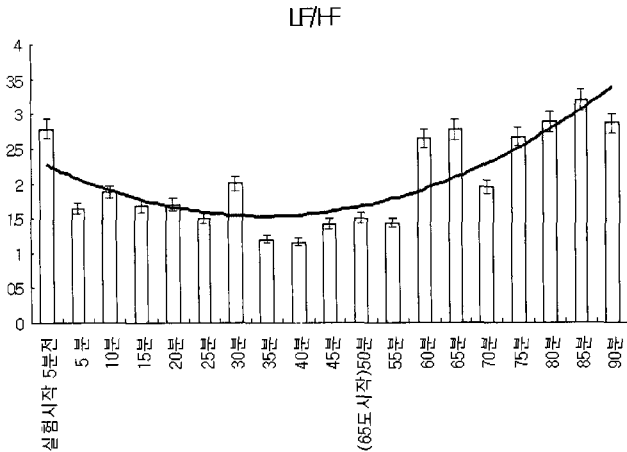
LF



(a) LF의 변화 추이



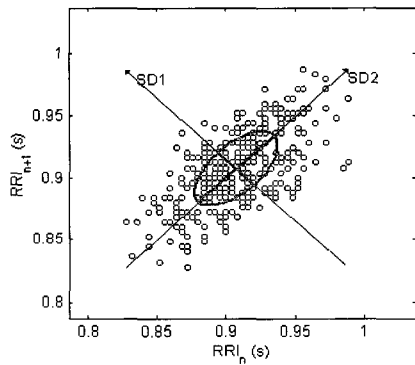
(b) HF의 변화 추이



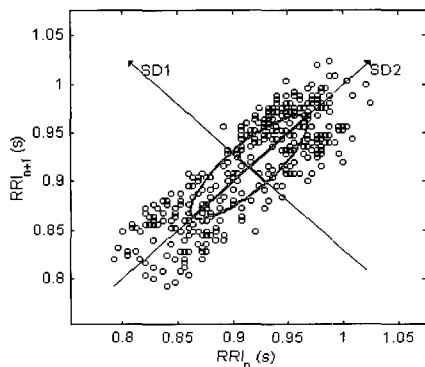
(c) LF/HF의 변화 추이

그림 6. LF, HF, LF/HF의 변화 추이  
Fig. 6. Change of LF, HF and LF/HF Ratio

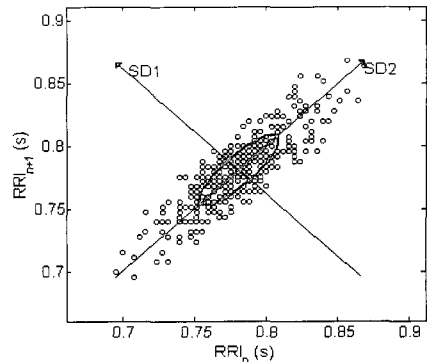
Poincaré plot 분석[12]은 R-R 간격을 이용하여 분산형태로 그려지며, 그림 7과 같이 폭(width : SD1)성분과 길이(length : SD2)성분을 구할 수 있다. 피험자 A의 Poincaré plot 데이터를 보면 실험 5분전에는 원의 가까운 모양을 하고 있으나, 실험 15분~20분 사이에는 SD1성분과 SD2성분 모두 증가하며, 실험 65분~70분 사이에는 SD1, SD2성분 모두 감소하며 원형에서 타원형으로 변화하는 것을 알 수 있다.



(a) 실험 5분전(SD1 : 18.6 ms, SD2 : 38.5 ms)



(b) 실험 15분후 (SD1 : 22.2 ms, SD2 : 72.5 ms)

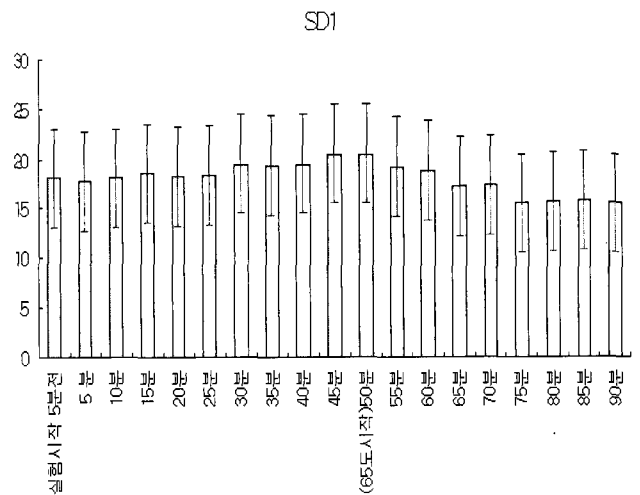


(d) 실험 65분후(SD1 : 10.9 ms, SD2 : 38.3 ms)

그림 7. 피험자 A의 Poincaré plot  
Fig. 7. Poincaré plot of Subject A

그림 8은 실험 대상자들의 SD1과 SD2의 변화 추이를 나타낸 것이다. SD1 성분은 실험 시작 5분전과 비교하여 44 °C의 온도에서 45분간 전체적으로 증가 하였다. 그러나 65 °C의 온도에서는 전체적으로 감소하는 것을 알 수 있다. SD2 성분은 SD1 성분보다는 복잡하게 반응하였는데 전체적으로 증가 하다가 65 °C의 온도에서 20분 지난 뒤엔 감소하였다.

그림 8의 (C)는 SD2/SD1의 변화 추이를 나타낸 것이다. 이는 LF/HF 비와 아주 유사한 패턴을 가지고 있다. 처음 44 °C의 온도에서는 45분간 SD2/SD1가 전체적으로 감소하다가 65 °C로 온도를 증가 시키고 5분이 지난 뒤 SD2/SD1 비가 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 전력 스펙트럼의 LF/HF의 변화 추이와 SD2/SD1의 변화 추이와 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다. 표 1은 측정된 SD1과 SD2를 수치로 정리한 것이다.



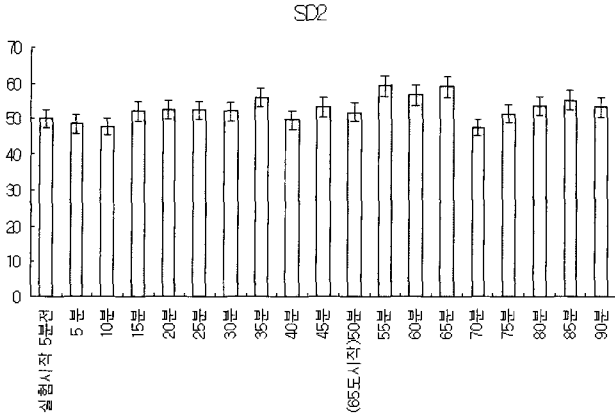
(a) SD1의 변화 추이

결론

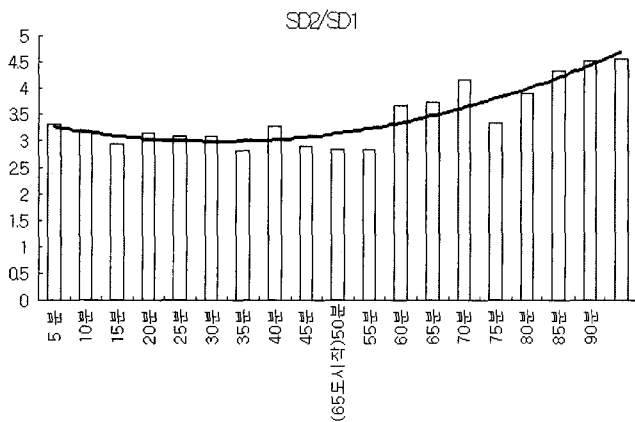
원적외선 온열 실험을 통해 심박변동 신호를 분석해보면 원적외선 온열에 노출되기 전보다 노출된 후에 RRI 및 LF와 HF의 특성이 복잡해 졌음을 관찰 할 수 있었다. 이것은 자율신경계가 관여하는 심혈관계 제어 메커니즘이 원적외선 온열에 노출되기 전보다 노출된 후에 더욱 복잡함을 암시한다고 할 수 있다. 이는 변화하는 내외적 환경에 대응하여 체내 항상성을 유지하도록 적극적으로 반응하여 인체가 안정화되기 위함임을 알 수 있다. 원적외선 온열효과가 인체의 심혈관계 제어시스템에 작용함을 LF와 HF를 미루어 유추할 수 있으며, 원적외선 온열효과에 노출 15분후 는 노출되기전 5분 보다 LF/HF가 1.66배 감소되었으며, 다시 노출 85분 후에는 이보다 1.15배 증가하였음을 관찰할 수 있었다. Poincaré plot 분석 방법에서는 SD2/SD1의 변화 추이와 전력 스펙트럼의 LF/HF 변화 추이가 상당히 유사한 것을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. 이병재, "카오스 이론을 이용한 생체 비선형 동역학 시스템의 특성 해석", 연세대학교 대학원, 박사학위 논문, 1995
2. A. Malliani, M. Pagani, F. Lombardi and S. Cerutti., "Cardiovascular Neural Regulation Explored in Frequency Domain", Circulation, No. 84, pp. 482-492, 1991
3. S. J. Pieper and S. C. Hammill, "Heart Rate Variability: Technique and Investigational Applications in Cardiovascular Medicine", Mayo Clin Proc, Vol. 70, pp. 955-964, 1995
4. K. Shin, "The Study on Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability for Assessment of Autonomic Functions in Cardiovascular Control", Keio University, The Ph. D. Dissertation, 1995
5. SM. Kay, "Modern Spectral Analysis: Theory and Application", Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J., 1987
6. K.S. Shin, H. Minamitani, M.H. Lee, "A new algorithm for obtaining an evenly-spaced heart rate variability signal from a cardiac event series", KITE Journal, Vol.6, No.2, pp40-49, 1995
7. S.M. Kay, S.L. Marple, "Spectral analysis - a modern perspective", Proc. IEEE, Vol.69, pp.1380-1419, 1981
8. S.J. Pieper, S.C. Hammill, "Heart rate variability : Technique and investigational applications in cardiovascular medicine", Mayo Clin. Proc., Vol. 70, pp.955-964, 1995
9. A. Malliani, F. Lombardi, M. Pagani, "Power spectrum analysis of heart rate variability : a tool to explore neural regulatory mechanism", British Heart J., Vol.72, pp.1-2, 1994
10. Y. Imai, "Heart rate measurement and outcome", Blood Press Monit, pp.53-5, Feb 2003
11. PRB. Barbosa, "The effect of the instaneous RR interval on the dynamic properties of the heart rate and the ventricular repolarization duration variability", Computer in Cardiology, pp. 821-824, 2000
12. M. Brennan, M. Palaniswami, and P. Kamen "Poincaré plot interpretation using a physiological model of HRV based on a network of oscillators" , American Journal of Physiology, Heart Circ Physiol, Vol 283, pp. H1873-H1886, 2002



(b) SD2의 변화 추이



(c)SD2/SD1의 변화 추이

그림 8. SD1, SD2, SD2/SD1의 변화 추이  
Fig. 8. Change of SD1, SD2 and SD2/SD1

표 1. SD1, SD2 및 SD2/SD1  
Table 1. SD1, SD2 and SD2/SD1

구분	SD1(ms)		SD2(ms)		SD2/SD1	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
실험시작 5분전	18.05	11.52	50.14	25.88	3.31	1.89
5분	17.70	11.28	48.43	22.46	3.19	1.27
10분	18.07	9.67	47.75	18.91	2.95	1.00
15분	18.53	8.37	52.09	18.19	3.16	1.32
20분	18.25	7.29	52.58	26.01	3.09	1.12
25분	18.41	7.47	52.37	17.40	3.09	1.09
30분	19.43	8.15	51.99	23.75	2.81	0.88
35분	19.32	8.25	56.06	22.69	3.29	1.58
40분	19.45	9.62	49.73	16.58	2.89	1.03
45분	20.46	10.49	53.21	18.65	2.85	0.87
50분(65도시작)	20.47	10.82	51.90	19.20	2.84	0.94
55분	19.13	10.88	59.43	23.77	3.68	1.80
60분	18.90	16.18	56.61	25.48	3.72	1.61
65분	17.23	14.49	59.02	26.60	4.16	1.78
70분	17.33	13.62	47.35	16.75	3.34	1.30
75분	15.56	11.63	51.39	21.73	3.89	1.55
80분	15.74	13.69	53.63	22.11	4.33	2.02
85분	15.91	15.57	55.19	22.18	4.53	2.09
90분	15.46	13.82	53.23	22.53	4.56	2.48